



ESTUDO DA VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DA LAMINAÇÃO DE VIDRO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

Daise Fernanda Rubio da Silva¹, Sílvia Paula Sossai Altoé², José Venâncio Pinheiro Rotta³, Isadora Bedusqui de Goes Radke⁴, Paulo Henrique Carvalho Mello⁵, Fernando Aparecido Costa Barizão⁶

¹Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PCV), Campus Maringá-PR, Universidade Estadual de Maringá – UEM. daiserbubio.ec@gmail.com

²Orientadora, Doutora, Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PCV), Campus Maringá-PR, Universidade Estadual de Maringá – UEM. spsaltoe@uem.br

³Mestre, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PCV), Campus Maringá-PR, Universidade Estadual de Maringá – UEM. josevprotta@hotmail.com

⁴Mestre, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PCV), Campus Maringá-PR, Universidade Estadual de Maringá – UEM. isadora_goes@hotmail.com

⁵Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PCV), Campus Maringá-PR, Universidade Estadual de Maringá – UEM. paulohcm123@gmail.com

⁶Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana (PEU), Campus Maringá-PR, Universidade Estadual de Maringá – UEM. fernandocostabarizao@hotmail.com

RESUMO

O cimento é um material produzido em quantidades elevadíssimas no mundo todo, contribuindo de forma massiva para a emissão de CO₂ e consequentes impactos ambientais. O uso de alguns resíduos industriais em adição ou substituição parcial ao cimento, na fabricação de concretos em geral, tem como objetivo valorizar produtos outrora descartados e reduzir o consumo de matérias-primas e energia. O resíduo da laminação de vidro, quando utilizado como adição ou substituição parcial ao cimento, além de promover benefícios econômicos e ambientais, também pode aprimorar a durabilidade dos elementos construtivos pelo preenchimento dos vazios (efeito filler) e ganho de resistência em idades avançadas (efeito pozolânico). Neste trabalho, foram confeccionados compósitos cimentícios sem PDV, misturas com adição 8% de pó de vidro (PDV) sobre o peso do cimento, e combinações mantendo 8% de adição de PDV com porcentagens de substituição parcial do cimento por PDV nos teores de 15, 20 e 25%. A partir dessas composições, foram moldados corpos de prova para a realização do ensaio de resistência à compressão axial aos 28 e 90 dias. Todas as misturas com PDV apresentaram evolução da resistência à compressão na ordem de 40%, de 28 para 90 dias, com destaque para a mistura com 8% de adição e 20% de substituição de cimento por PDV, que apresentou 44,3% de evolução da resistência à compressão de 28 para 90 dias, indicando que a presença de PDV nos compósitos cimentícios foi capaz de promover taxas de evolução da resistência à compressão ao longo do tempo.

PALAVRAS-CHAVE: Concreto; Efeito filler e pozolânico; Pó de vidro; Sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

É de extrema relevância que o desempenho ambiental e econômico de um material esteja simultaneamente equilibrado com o desempenho técnico ou funcional que se pretende alcançar (LIPPIATT & AHMAN, 2004).

Os impactos ambientais causados pela fabricação do concreto, principalmente durante a produção de cimento, atingem proporções regionais e globais. Segundo Mehta e Monteiro (2014), entre os materiais que compõem o concreto, o cimento Portland é o material que possui maior custo e consumo energético para ser fabricado, podendo emitir cerca de 1000 kg de CO₂ para cada tonelada de clínquer produzido.

Dado que o cimento é indispensável para a produção de concreto, que por sua vez é um dos materiais mais utilizados no mundo, medidas redutoras e/ou mitigadoras dos impactos desta indústria no ambiente são muito importantes e devem ser amplamente estudadas.

As adições minerais quimicamente ativas podem ser utilizadas como substituição parcial ao cimento para melhorar o desempenho econômico e ambiental do compósito.



Além disso, se bem dosados, podem aumentar a resistência e a durabilidade do concreto, como é o caso da sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz (TUTIKIAN, DAL MOLIN, 2021).

Como agregado graúdo ou miúdo, o resíduo de vidro não se apresenta interessante ao concreto devido às reações expansivas álcalis-sílica. Entretanto, o resíduo em forma de pó, utilizado como material cimentício suplementar, é capaz de melhorar as propriedades de resistência e durabilidade de argamassas e concretos pelo seu potencial pozôlanico e preenchimento de vazios, além de reduzir custos de produção dos compósitos e amenizar impactos ambientais, dados pela emissão de CO₂ por tonelada de concreto produzido e pelo acúmulo do resíduo em aterros.(HIGUCHI, 2018).

O resíduo de vidro em forma de pó pode ser obtido por meio da moagem do vidro, ou pela coleta do pó que é gerado no momento de laminação (corte) desse material.

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a viabilidade técnica do emprego de resíduo da laminação do vidro, denominado pó de vidro (PDV), como material cimentício suplementar em concretos. Os objetivos específicos compreendem: analisar o efeito da adição e substituição parcial de cimento por pó de vidro (PDV), em argamassas de cimento Portland, no estado fresco e endurecido, além de verificar a viabilidade de utilização do resíduo da laminação de vidro na fabricação de concretos, avaliando a resistência à compressão aos 28 e 90 dias.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizado cimento Portland CP V ARI(Alta Resistência Inicial), segundo classificação da ABNT NBR 16697 (2018), com propriedades físico-químicas apresentadas na Tabela 1. Como aditivo, foi utilizado um superplasticificante à base de policarboxilato, conforme as especificações do fabricante apresentadas na Tabela 2.

Como agregado miúdo, utilizou-se areia fina natural, com massa específica igual a 2,66 g/cm³, de acordo com a ABNT NBR NM 52 (2002), e com módulo de finura igual a 1,91, cuja distribuição granulométrica pode ser visualizada no Gráfico 1, segundo a ABNT NBR 17054 (2022).

Tabela 1:Propriedades físico-químicas do cimento Portland

Estado físico	Sólido
Forma	Pó
Cor	Cinza
Ph	13
Massa específica aparente	1,20 g/cm ³
Densidade	2,99 g/cm ³

Fonte:Fabricante (Cimento Nacional)

Tabela 2:Especificações do aditivo superplasticificante

Identificação	ADVA 458
Base química	Éter policarboxilato
Aspecto	Líquido
Cor	Âmbar - marrom
Ph	4 - 6
Densidade	1,075 – 1,115 g/cm ³
Sólidos	45,13 – 49,88 %
Recomendação de dosagem	0,4 – 1,5% s.p.c.*

*s.p.c.: sobre o peso do cimento



Fonte: Fabricante (GCP Brasil)

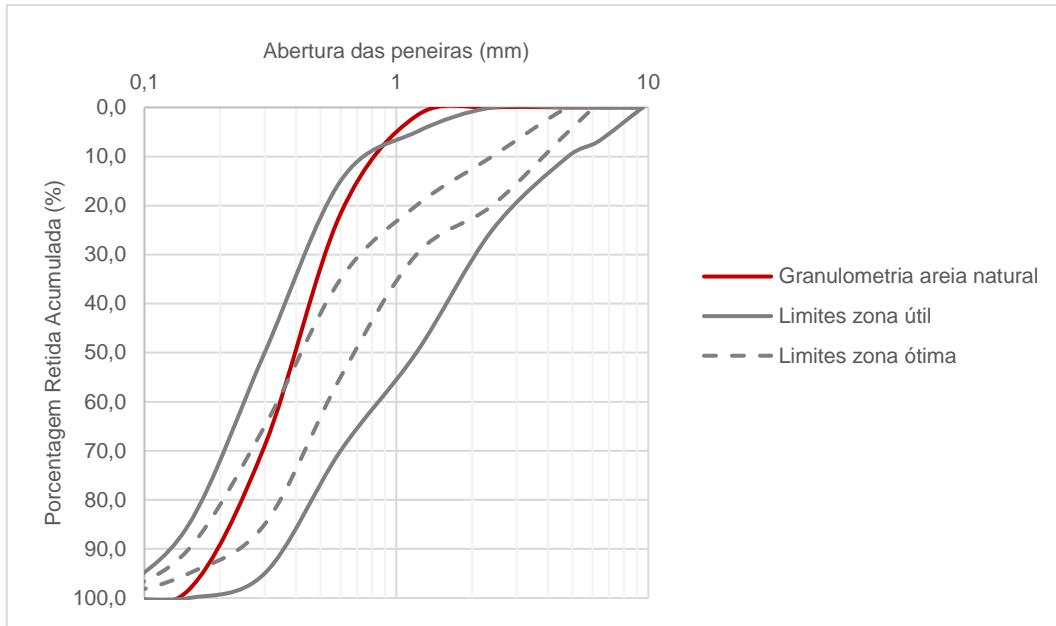


Gráfico 1: Distribuição granulométrica do agregado miúdo

Fonte: Dados da pesquisa

O pó de vidro (PDV) - resíduo utilizado neste estudo – foi fornecido por uma empresa industrial, situada na cidade de Apucarana-PR, e provém da laminação (corte) do vidro temperado, uma das etapas para a determinação das dimensões das placas vítreas comercializadas. O subproduto da laminação do vidro é uma mistura constituída por PDV e água. Essa mistura passa por um processo de decantação em funis (Figura 1) antes de ser destinado ao aterro sanitário.



Figura 1: Decantação em funis da mistura de PDV e água na empresa

Fonte: Autores

O PDV coletado na empresa (Figura 2a), após a decantação, foi espalhado sobre uma lona plástica para a secagem ao ar livre. Após a secagem (Figura 2b), o pó de vidro foi inserido em um moinho de barras para que todos os torrões (aglomerados de pó) se desfizessem. Cada porção de 5 kg de resíduo foi submetido ao processo de moagem por 20 minutos para que o material se apresentasse em forma de pó (Figura 2c). No laboratório, foi verificado que o pó de vidro possui índice de finura de 10%, segundo a ABNT NBR 11579 (2012), e massa específica igual a 2,52 g/cm³, a partir da ABNT NBR 6458 (2016).

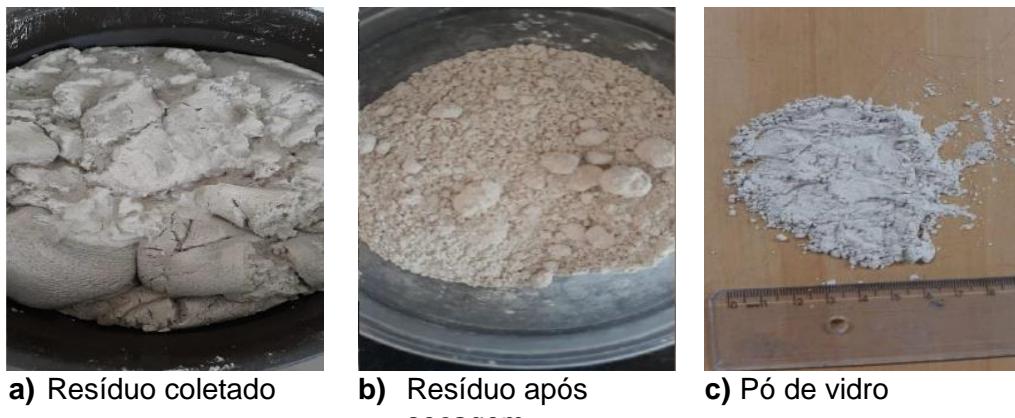


Figura 2: Etapas de obtenção do pó de vidro para utilização.

Fonte:Autores

Para avaliar a viabilidade de utilização do resíduo como material cimentício suplementar ao cimento na fabricação de concretos, foi realizada determinação do índice de desempenho do pó de vidro em argamassas de cimento Portland, método da ABNT NBR 5752 (2014) adaptado para este estudo. O índice de desempenho permite verificar quais teores de substituição de cimento proporcionam uma performance equivalente ou superior ao concreto de referência (sem o resíduo), em relação à resistência à compressão axial no estado endurecido.

Considerando que a mistura referência (sem PDV) e as misturas com substituições parciais do cimento por pó de vidro possuem as mesmas proporções de materiais, a mesma relação água/cimento e as mesmas condições de cura e moldagem, o cálculo do índice de desempenho (k) pode ser realizado a partir da Equação 1, adaptada da ABNT NBR 5752 (2014):

$$k = \frac{f_{c_{PDV}}}{f_{c_{REF}}} \cdot 100 \quad (1)$$

onde,

k é o índice de desempenho com cimento Portland na idade de ensaio, expresso em porcentagem;

$f_{c_{PDV}}$ é a resistência à compressão média, na idade de ensaio, dos corpos de prova moldados com adição e/ou substituição parcial do cimento por pó de vidro, expressa em megapascals (MPa);

$f_{c_{REF}}$ é a resistência à compressão média, na idade de ensaio, dos corpos de prova moldados com a mistura referência sem adição e/ou substituição de cimento pó de vidro, expressa em megapascals (MPa);

A proporção base dos materiais utilizada é semelhante à proporção recomendada na ABNT NBR 7215 (2019). Foram realizados 5 traços diferentes, cujas proporções foram apresentadas no Quadro 1. Foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos, de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura, para cada traço do estudo.

Quadro 1:Traços realizados na pesquisa

Descrição da Mistura	Mistura referência 1 sem substituição	Mistura referência 2 com adição de	Mistura com adição de 50g de PDV e substituição de 15% de	Mistura com adição de 50g de PDV e substituição de 20% de	Mistura com adição de 50g de PDV e substituição de 25% de
----------------------	---------------------------------------	------------------------------------	---	---	---



	e/ou adição de PDV	50g de PDV	cimento por PDV	cimento por PDV	cimento por PDV
Identificação	A-R-1	A-R-2	A-15	A-20	A-25
Cimento (g)	650,0	650,0	502,5	470,0	437,5
PDV (g)	0,0	50,0	147,5	180,0	212,5
Areia (g)	1950,0	1950,0	1950,0	1950,0	1950,0
Água (g)	357,5	357,5	357,5	357,5	357,5
SP (g)	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2

Fonte:Dados da pesquisa

Os corpos de prova foram moldados, submetidos à cura em câmara úmida até a data de ensaio, e retificados para garantir a planicidade das bases, conforme as recomendações da ABNT NBR 5738 (2015). Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de compressão axial, seguindo as diretrizes da ABNT NBR 5739 (2018). Para cada traço, foram rompidos 3 corpos de prova (CPs) aos 28 dias e 3 CPs aos 90 dias, utilizando a prensa hidráulica da marca Emic, modelo PCE1000C, do laboratório P02 na UEM. Foi calculado o desvio-padrão das resistências dos 3 corpos de prova de cada traço e de cada idade de ensaio.

Além da resistência à compressão no estado endurecido, foi realizado o ensaio adaptado de mini abatimento, desenvolvido por Kantro (1980), utilizando um mini cilindro tronco-cônico, com objetivo de avaliar como o PDV influencia a consistência das misturas no estado fresco.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do ensaio de mini abatimento das misturas, no estado fresco, encontram-se no Quadro 2. Foi possível identificar que a mistura sem PDV (A-R-1) apresentou espalhamento médio de 23,3 cm e exsudação nas extremidades pelo excesso de água na mistura, enquanto que no traço com adição de 50g de PDV (A-R-2) o espalhamento médio foi de 14 cm, ainda com exsudação nas extremidades, dado pelo excesso de água, mas em menor intensidade. Essa diminuição busca de espalhamento, do traço A-R-1 para o A-R-2, se deu pelo aumento de 50g de sólidos do compósito, que absorveram mais água. Mesmo assim, a mistura A-R-2 continuou apresentando excesso de água, como comentado anteriormente.

Por outro lado, nas misturas com percentual de substituição do cimento por PDV (A-15, A-20 e A-25), não houve exsudação, e os sólidos se apresentaram dispersos de forma homogênea ao longo do espalhamento da mistura. Isso indica que o PDV possui maior absorção de água do que o cimento, mesmo não sendo tão fino quanto este.

Sabendo da maior absorção de água do PDV, esperava-se que os traços A-15, A-20 e A-25, apresentassem espalhamentos muito baixos, com alta perda de trabalhabilidade. Porém, foi possível verificar que nesses traços, o espalhamento foi de 18 cm (somente 5 cm a menos do que o traço sem PDV), e que a mistura se manteve coesa e trabalhável mesmo aumentar o teor de substituição de cimento pelo resíduo.

Essa característica de absorção de água e manutenção de trabalhabilidade da mistura é muito útil para misturas superfluidas, como os concretos autoadensáveis, que necessitam de alta fluidez da mistura no estado fresco, ao passo em que se mantém coesa, sem apresentar exsudação e separação de materiais durante o adensamento.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial das misturas, no estado endurecido, foram apresentados no Quadro 3. O valor apresentado é resultado de uma média dos 3 corpos de prova rompidos para cada traço e idade de ensaio. O desvio-padrão



dos resultados obtidos se apresentou entre 0,7 e 2,5, mostrando que a média das resistências calculada é representativa.

Quadro 2: Resultados do ensaio de mini abatimento das misturas no estado fresco: médias de 3 diâmetros do espalhamento de cada mistura e aspecto visual.

Nome da mistura	A-R-1: Mistura referência 1 sem PDV	A-R-2: Mistura referência 2 com adição de 50g de PDV	A-15: Mistura com adição de 50g de PDV e substituição de 15% de cimento por PDV	A-20: Mistura com adição de 50g de PDV e substituição de 20% de cimento por PDV	A-25: Mistura com adição de 50g de PDV e substituição de 25% de cimento por PDV
Foto do ensaio					
Média das medidas 1, 2 e 3 (cm)	23,3	14,0	18,6	17,4	18,2
Aspecto Visual	Concentração dos sólidos no centro e exsudação	Densa concentração dos sólidos no centro e exsudação	Mistura homogênea sem exsudação	Mistura homogênea, sem exsudação	Mistura homogênea sem exsudação

Fonte:Dados da pesquisa

Observou-se que a mistura que contém adição de PDV (A-R-2), assim como as misturas que contém adição e substituição parcial do cimento por PDV (A-15, A-20 e A-25) apresentaram evolução da resistência média à compressão superior a 40%, dos 28 dias para os 90 dias, enquanto que a mistura sem PDV (A-R-1) apresentou evolução somente de 3,1%. Isso indica que o PDV influencia no ganho de resistência do compósito em idades mais avançadas, como é possível visualizar no Gráfico 2, em que somente a mistura A-R-1 se mantém na mesma linha de resistência dos 28 para 90 dias.

Quadro 3: Resultado do ensaio de compressão axial média (fcm) dos corpos de prova rompidos aos 28 e 90 dias.

Identificação da mistura	Idade de ensaio				Porcentagem de evolução da resistência dos 28 aos 90 dias	
	28 dias		90 dias			
	fcm (MPa)	Desvio-padrão	fcm (MPa)	Desvio-padrão		
A-R-1	27,2	2,5	28,0	2,2	3,1%	
A-R-2	33,9	1,9	48,2	2,2	42,3%	
A-15	27,3	1,1	39,1	0,7	43,3%	
A-20	28,8	1,3	41,6	2,4	44,3%	
A-25	25,5	2,4	36,4	2,2	42,5%	

Fonte:Dados da pesquisa

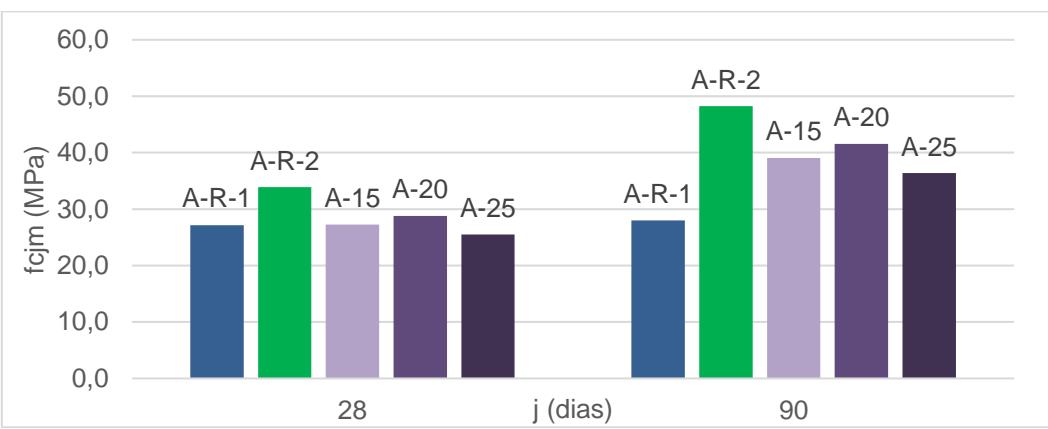


Gráfico 4: Resistência à compressão axial média de todas as misturas aos 28 e 90 dias.

Os índices de desempenho (k) das misturas foram calculados conforme a Equação 1 e foram apresentados nos Quadros 4 e 5.

O índice k da mistura A-R-2 foi calculada tendo como referência a mistura A-R-1. Conforme apresentado no Quadro 4, a mistura A-R-2, que possui adição de 50 g de PDV, possui índice k de 1,25, maior do que 1, indicando que possui maior eficiência do que a mistura A-R-1, que não possui PDV, principalmente na idade de 90 dias, em que apresentou índice k igual a 1,72.

Quadro 4: Índice de desempenho da mistura A-R-2 tendo como referência a mistura A-R-1.

Identificação da mistura	Índice k	
	28 dias	90 dias
A-R-2	1,25	1,72

Fonte: Dados da pesquisa

O Gráfico 3 mostra uma comparação das resistências obtidas para as misturas A-R-1 e A-R-2, indicadas no Quadro 4, onde é possível observar que a resistência do compósito A-R-2 com 50 g de adição de PDV se apresenta 25% e 72% mais resistente aos 28 e 90 dias, respectivamente, se comparada com a resistência da mistura A-R-1, sem PDV.

Por outro lado, o índice de desempenho das misturas com adição e substituição parcial do cimento por PDV, se apresentaram menos eficientes do que a mistura A-R-2 que possui somente adição de PDV na mistura, sem substituição de cimento pelo resíduo, conforme apresentado no Quadro 5, pois o índice k calculado é menor do que 1 em ambas idades de ensaio. O Gráfico 4 mostra que o desempenho da mistura A-R-2 é maior do que as outras misturas A-15, A-20 e A-25. Esse resultado já era esperado porque todas as misturas apresentadas no Quadro 5 e no Gráfico 4, também possuem adição de PDV que promovem uma taxa similar de ganho de resistência com o tempo.

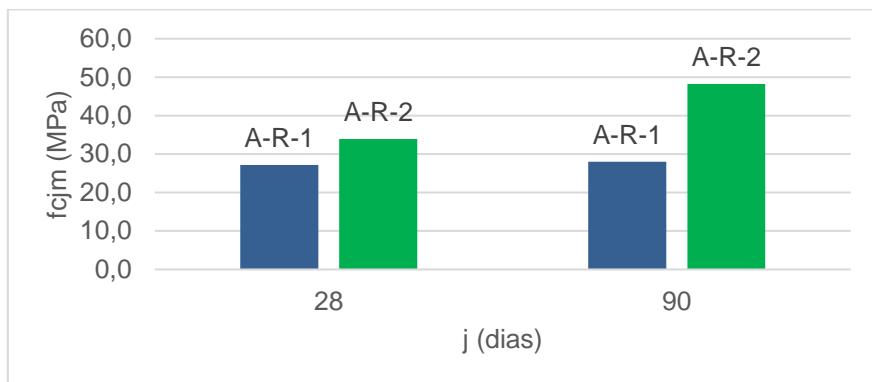


Gráfico 3: Resistência à compressão axial média das misturas A-R-1 e A-R-2 aos 28 e 90 dias.

Fonte: Dados da pesquisa

Quadro 5: Índice de desempenho das misturas A-15, A-20 e A-25 tendo como referência a mistura A-R-2.

Identificação da mistura	Índice k	
	28 dias	90 dias
A-15	0,80	0,81
A-20	0,85	0,86
A-25	0,75	0,75

Fonte: Dados da pesquisa

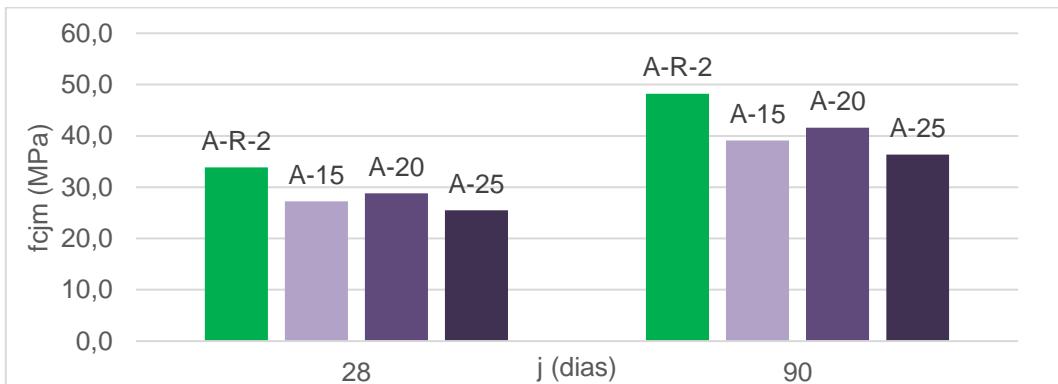


Gráfico 4: Resistência à compressão axial média das misturas com PDV aos 28 e 90 dias.

Fonte: Dados da pesquisa

É nítido que as misturas com PDV apresentam evolução de resistência com o tempo, dado a taxa de crescimento da resistência média à compressão dos compósitos nas idades de 28 e 90 dias. O ganho de resistência obtido para as misturas com PDV pode ser dado pelo efeito filler e/ou pozolânico que o resíduo proporciona à mistura. Como o estudo foi realizado em compósitos cimentícios sem agregado graúdo e com areia fina (deixando a mistura com maior compacidade em relação à misturas de concretos convencionais), o ganho de resistência obtido nos compósitos com PDV pode não estar atrelado ao efeito filler, que acontece quando a maior compacidade da mistura gera aumento de resistência à compressão, massim, pelo efeito pozolânico do material, que possui reação lenta e promove o ganho de resistência das misturas em idades mais avançadas, como ocorreu neste estudo.

4 CONCLUSÃO



Em comparação à mistura sem PDV, a mistura com percentual de 8% (sobre o peso do cimento) de adição do resíduo, apresentou aumento da resistência à compressão em 25% aos 28 dias e 72% aos 90 dias. Além disso, todas as misturas com PDV apresentaram evolução da resistência na ordem de 40%, de 28 para 90 dias, com destaque para a mistura A-20 com 44,3% de evolução.

Pelo seu comportamento verificado no estado fresco, o PDV pode ser estudado para ser utilizado como adição em concretos autoadensáveis, como forma de evitar a exsudação da mistura e manter a consistência requerida no estado fresco.

Pelo seu comportamento no estado endurecido, o PDV pode ser estudado para ser utilizado como adição e/ou substituição parcial ao cimento em outros tipos de concreto, dado sua evolução de resistência com o tempo.

Portanto, frente aos resultados obtidos, é possível afirmar que o resíduo pó de vidro (PDV) possui potencial para ser utilizado como adição e/ou como material cimentício suplementar em diversos tipos de concreto, e deve ser amplamente estudado, sendo importante a análise de compatibilidade com o aço e o estudo de durabilidade do material em ambientes e classes de agressividade variados.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5752: Materiais pozolânicos — determinação do índice de desempenho com cimento portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7215: Cimento portland - determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11579: Cimento portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (Nº 200). Rio de Janeiro, 2012.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16697: Cimento portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 17054: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.



Associação Brasileira de Normas Técnicas. Norma Mercosur. NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2002.

HIGUCHI, 2018. **Estudo do desempenho do resíduo de vidro moído como material cimentício suplementar para aplicação em concreto autoadensável de alto desempenho.** 2018. 149f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2018. abr. 2023.

KANTRO, D.L. (1980). **Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste – A Miniature Slump Test.** Cement, Concrete and Aggregate, v. 2, n, 2, 1980, p. 95-102.

LIPPIATT, B.; AHMAD, S. **Measuring the life-cycle environmental and economic performance of concrete: the BEES approach.** International workshop on sustainable development and concrete technology. Pequim, p. 213 - 230, 2004.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. (2014). **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 2.ed. São Paulo: IBRACON.

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; DAL MOLIN, Denise Carpêna. **Concreto Autoadensável.** São Paulo: Leud, 2021.